

Inhaltsverzeichnis

I Einleitung (W. Boeck)

II Beanspruchungen von Isolieranordnungen (K. Möller)

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Aufgaben von Isolierungen | 9 |
| 1.1 | Elektrische Aufgaben | 9 |
| 1.2 | Mechanische Aufgaben | 9 |
| 1.3 | Thermische Aufgaben | 10 |
| 1.4 | Chemische Beständigkeit und Umweltverträglichkeit | 10 |
| 1.5 | Beispiele typischer Isolieranordnungen | 10 |
| 2 | Elektrische Beanspruchungen von Isolieranordnungen | 16 |
| 2.1 | Stationäre Spannungsbeanspruchungen | 16 |
| 2.1.1 | Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz | 16 |
| 2.1.1.1 | Erdschluß | 16 |
| 2.1.1.2 | Lastabwurf | 18 |
| 2.1.1.3 | Ferranti-Effekt | 19 |
| 2.1.2 | Zeitweilige Spannungserhöhungen mit einer von der Betriebsfrequenz abweichenden Frequenz | 19 |
| 2.1.2.1 | Resonanzen | 20 |
| 2.1.2.2 | Kippschwingungen | 21 |
| 2.2 | Schaltspannungen | 21 |
| 2.2.1 | Bezugsgröße für die Amplitude von Schaltspannungen | 22 |
| 2.2.2 | Einschalten langer unbelasteter Leitungen | 22 |
| 2.2.3 | Ausschalten kleiner induktiver Ströme | 24 |
| 2.2.4 | Transiente Spannungen bei Erdschlüssen | 26 |
| 2.2.5 | Kennzeichnung von Schaltspannungen für Prüfzwecke | 28 |
| 2.3 | Blitzüberspannungen | 28 |
| 2.3.1 | Entstehung und Kenndaten von Blitzenentladungen | 28 |
| 2.3.2 | Entstehung von Blitzüberspannungen | 28 |
| 2.3.2.1 | Direkter Blitzeinschlag in ein Leiterseil | 28 |
| 2.3.2.2 | Rückwärtiger Überschlag | 28 |
| 2.3.2.3 | Indirekte Blitzeinschläge | 29 |
| 2.3.3 | Beurteilung und Kennzeichnung von Blitzüberspannungen | 29 |

| | | |
|------------|--|----|
| VIII | Inhaltsverzeichnis | |
| 3 | Innere elektrische Beanspruchung von Isolieranordnungen | 30 |
| 3.1 | Homogene Isolierungen | 30 |
| 3.2 | Kondensatorkette | 31 |
| 3.2.1 | Isolatorkette mit kapazitiver Verkettung | 31 |
| 3.3 | Beurteilung und Überleitung | 32 |
| III | Bestimmung elektrostatischer Felder (K. Möller) | |
| 4 | Grundgesetze und Eigenschaften des elektrostatischen Feldes | 35 |
| 4.1 | Grundbegriffe | 35 |
| 4.2 | Maxwellsche Gleichungen und Grundgesetze des elektro- statischen Feldes | 36 |
| 4.3 | Potentialgleichungen des elektrischen Feldes | 37 |
| 4.4 | Feldgrößen an Grenzflächen | 37 |
| 5 | Berechnung elektrostatischer Felder | 39 |
| 5.1 | Geschlossene Berechnung einfacher Felder | 39 |
| 5.1.1 | Lösung der Laplaceschen Differentialgleichung | 39 |
| 5.1.2 | Ladungsverfahren | 41 |
| 5.1.2.1 | Anwendung der Grundgesetze | 41 |
| 5.1.2.2 | Überlagerungsverfahren | 42 |
| 5.1.3 | Konforme Abbildung | 45 |
| 5.1.3.1 | Prinzip der konformen Abbildung | 45 |
| 5.1.3.2 | Berechnung der elektrischen Feldstärke | 46 |
| 5.1.3.3 | Beispiele | 47 |
| 5.1.4 | Einfache Raumladungsfelder | 51 |
| 5.1.4.1 | Raumladungen und ihre Entstehung | 51 |
| 5.1.4.2 | Beispiele | 51 |
| 5.1.5 | Dielektrikum mit zylindrischer Schichtung | 53 |
| 5.2 | Numerische Berechnung elektrostatischer Felder | 54 |
| 5.2.1 | Differenzenverfahren | 55 |
| 5.2.1.1 | Grundlagen | 55 |
| 5.2.1.2 | Rechengang beim Differenzenverfahren | 57 |
| 5.2.1.3 | Beispiele | 57 |
| 5.2.1.4 | Netzverfeinerung und Kontrolle | 58 |
| 5.2.1.5 | Dreidimensionale Felder | 58 |
| 5.2.2 | Finite-Elemente-Methode | 60 |
| 5.2.2.1 | Grundlagen | 60 |
| 5.2.2.2 | Dreidimensionale Felder | 62 |
| 5.2.3 | Ersatzladungsverfahren | 62 |
| 5.2.3.1 | Grundlagen | 62 |
| 5.2.3.2 | Rechengang beim Ersatzladungsverfahren | 63 |
| 5.2.3.3 | Ladungsformen | 63 |
| 5.2.3.4 | Berechnung geschichteter Dielektrika | 65 |
| 5.2.3.5 | Elektroden auf freiem Potential | 66 |
| 5.2.4 | Monte-Carlo-Methode | 66 |
| 5.2.4.1 | Grundlagen | 67 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 5.2.4.2 | Berechnung von Randfeldstärken | 67 |
| 5.2.4.3 | Berechnung geschichteter Dielektrika | 67 |
| 5.2.5 | Vergleich der numerischen Feldberechnungsverfahren . . . | 67 |
| 5.2.5.1 | Prinzipielle Fehlerquellen der numerischen Verfahren . . . | 67 |
| 5.2.5.2 | Adaptionsaufwand, Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf . . | 68 |
| 5.3 | Optimierung von Elektrodenanordnungen | 69 |
| 5.3.1 | Geschlossene Optimierung | 69 |
| 5.3.1.1 | Zylinderkondensator | 69 |
| 5.3.1.2 | Kugelkondensator | 70 |
| 5.3.2 | Numerische Optimierung | 70 |
| 5.3.2.1 | Verschiebung von Konturpunkten | 70 |
| 5.3.2.2 | Veränderung des Ersatzladungssystems | 70 |
| 5.4 | Abschätzung von Maximalfeldstärken | 72 |
| 5.4.1 | Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger | 72 |
| 5.4.2 | Grundanordnungen | 73 |
| 5.4.3 | Graphische Bestimmung elektrostatischer Felder (Lehmann-Verfahren) | 73 |
| 6 | Messung elektrostatischer Felder | 75 |
| 6.1 | Direkte Messung | 75 |
| 6.1.1 | Kapazitätssonde | 75 |
| 6.1.2 | Kompensationsverfahren (Brückenverfahren) | 75 |
| 6.2 | Analoge Abbildung elektrostatischer Felder | 76 |
| 6.2.1 | Abbildung ebener Felder auf leitfähigem Papier | 76 |
| 6.2.2 | Elektrolytischer Trog | 76 |
| 6.2.3 | Widerstandsnetzwerke | 77 |
| IV | Elektrische Festigkeit (W. Boeck, Kap. 7; M. Beyer, Kap. 8) | |
| 7 | Gasförmige Isolierstoffe | 81 |
| 7.1 | Grundaufbau und Grundeigenschaften von Gasen | 81 |
| 7.1.1 | Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle | 81 |
| 7.1.2 | Allgemeine Gasgleichung | 82 |
| 7.1.3 | Mittlere freie Weglänge | 83 |
| 7.2 | Ladungsträgerbewegung | 86 |
| 7.2.1 | Ladungsträgerbewegung im Vakuum | 86 |
| 7.2.2 | Ladungsträgerbewegung im Gas | 86 |
| 7.3 | Ionisations-, Anregungs- und Anlagerungsprozesse | 89 |
| 7.3.1 | Prozeßenergien | 89 |
| 7.3.2 | Raumionisationsprozesse | 91 |
| 7.3.2.1 | Thermische Ionisation | 91 |
| 7.3.2.2 | Photoionisation | 92 |
| 7.3.2.3 | Stoßionisation | 93 |
| 7.3.3 | Oberflächenemissionsprozesse | 95 |
| 7.3.3.1 | Feldemission | 95 |
| 7.3.3.2 | Thermoemission | 95 |
| 7.3.3.3 | Photoemission | 96 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 7.3.3.4 | Sekundärelektronenemission (γ -Prozeß) | 96 |
| 7.3.4 | Rekombination der Ladungsträger und Ladungsträgergleichgewicht | 96 |
| 7.3.5 | Elektronenanlagerung | 97 |
| 7.4 | Entladungsaufbau | 98 |
| 7.4.1 | Strom-Spannungs-Kennlinie einer Entladungsstrecke | 98 |
| 7.4.2 | Lawinenbildung und effektiver Ionisationskoeffizient | 99 |
| 7.5 | Durchschlagmechanismen in homogenen und quasihomogenen Anordnungen | 100 |
| 7.5.1 | Streamerdurchschlag | 100 |
| 7.5.2 | Generationendurchschlag | 103 |
| 7.5.3 | Paschenabhängigkeit und Ähnlichkeitsgesetz des Gasdurchschlags | 105 |
| 7.5.4 | Durchschlag von Mischgasen | 109 |
| 7.5.5 | Einfluß der Elektrodenrauigkeit auf den Durchschlag | 111 |
| 7.6 | Durchschlag im inhomogenen Feld | 114 |
| 7.6.1 | Polaritätseinfluß durch Raumladungsbildung | 114 |
| 7.6.1.1 | Positive Spitze-Platte | 114 |
| 7.6.1.2 | Negative Spitze-Platte | 114 |
| 7.6.2 | Streamerentladung | 115 |
| 7.6.2.1 | Positive Streamerentladung | 116 |
| 7.6.2.2 | Negative Streamerentladung | 116 |
| 7.6.3 | Leaderentladung | 117 |
| 7.6.4 | Streamerdurchschlag technischer Anordnungen | 118 |
| 7.6.5 | Leaderdurchschlag technischer Anordnungen | 118 |
| 7.6.5.1 | Räumlich-zeitlicher Entladungsaufbau | 118 |
| 7.6.5.2 | Rechenverfahren für den Leaderdurchschlag | 120 |
| 7.7 | Zündverzug und Durchschlagsverhalten bei transienter Spannungsbeanspruchung | 122 |
| 7.7.1 | Statistische Streuzeit | 123 |
| 7.7.1.1 | Anfangselektronenrate | 123 |
| 7.7.1.2 | Lawinenbildung | 124 |
| 7.7.2 | Streameraufbauzeit | 126 |
| 7.7.3 | Funkenaufbauzeit | 128 |
| 7.7.4 | Spannungs-Zeit-Kennlinie | 130 |
| 7.8 | Blitzentladung | 132 |
| 7.8.1 | Meteorologischer Aufbau der Gewitterwolke | 132 |
| 7.8.2 | Elektrizitätsentwicklung im Gewitter | 135 |
| 7.8.3 | Vorgang der Blitzentladung | 135 |
| 7.8.3.1 | Abwärtsblitz | 135 |
| 7.8.3.2 | Aufwärtsblitz | 136 |
| 7.8.4 | Gefährdungsparameter von Blitzen | 136 |
| 7.9 | Überschlag an Isolierstoffoberflächen | 138 |
| 7.9.1 | Gleitentladung an Isolierstoffoberflächen | 139 |
| 7.9.2 | Fremdschichtüberschlag längs Isolierstoffoberflächen | 141 |
| 7.10 | Vakuumdurchschlag | 143 |
| 8 | Flüssige und feste Isolierstoffe | 145 |
| 8.1 | Isolierflüssigkeiten | 145 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 8.1.1 | Physiko-chemische Eigenschaften | 145 |
| 8.1.2 | Grundlagen der Leitungsmechanismen in dielektrischen Flüssigkeiten | 148 |
| 8.1.2.1 | Gleichstromleitfähigkeit | 148 |
| 8.1.2.2 | Dielektrischer Verlustfaktor und Dielektrizitätszahl | 149 |
| 8.1.2.3 | Begriffe, Definitionen und Ersatzschaltbilder | 149 |
| 8.1.2.4 | Leitungs- und Polarisationsmechanismen | 151 |
| 8.1.3 | Durchschlagmechanismen in Flüssigkeiten | 154 |
| 8.1.3.1 | Verschleierte Gasentladung | 154 |
| 8.1.3.2 | Faserbrückendurchschlag | 155 |
| 8.1.3.3 | Messung der Durchschlagspannung von Isolierflüssigkeiten | 155 |
| 8.1.3.4 | Einfluß von Temperatur, Gas- und Wassergehalt auf die Durchschlagfestigkeit | 157 |
| 8.1.3.5 | Elektrische Festigkeit im Bereich stationärer Teilentladungen | 158 |
| 8.1.4 | Arten von Isolierflüssigkeiten | 160 |
| 8.1.4.1 | Isolieröle auf Mineralölbasis | 160 |
| 8.1.4.2 | Synthetische Isolierflüssigkeiten | 162 |
| 8.1.5 | Aufbereitung von Isolierflüssigkeiten | 166 |
| 8.2 | Feste Isolierstoffe | 167 |
| 8.2.1 | Leitungs- und Verlustmechanismen | 167 |
| 8.2.1.1 | Gleichstromleitung | 167 |
| 8.2.1.2 | Wechselspannungsverluste | 173 |
| 8.2.2 | Durchschlagprozesse | 178 |
| 8.2.2.1 | Elektrischer Durchschlag | 180 |
| 8.2.2.2 | Wärmedurchschlag | 183 |
| 8.2.2.3 | Teilentladungen, Erosionsdurchschlag, elektrische Alterung | 186 |
| 8.2.3 | Arten fester Isolierstoffe | 187 |
| 8.2.3.1 | Keramische Isolierstoffe | 187 |
| 8.2.3.2 | Gläser | 189 |
| 8.2.3.3 | Glimmer | 189 |
| 8.2.3.4 | Hochpolymere Isolierstoffe | 190 |
| 8.2.3.5 | Thermoplaste | 191 |
| 8.2.3.6 | Elastomere | 198 |
| 8.2.3.7 | Duroplaste | 200 |
| 8.3 | Mischdielektrika | 215 |
| 8.3.1 | Imprägnierte Foliendielektrika | 215 |
| 8.3.2 | Papier-Öl-Dielektrikum | 217 |
| 8.3.2.1 | Papier | 217 |
| 8.3.2.2 | Imprägniertes Isolierpapier | 221 |
| 8.3.3 | Imprägnierte Papier/Kunststoff-Dielektrika | 222 |
| 8.3.4 | Hartpapiere | 224 |
| 8.3.5 | Transformerboard | 224 |

V Erzeugung und Messung hoher Prüfspannungen
(W. Zaengl)

| | | |
|-------|---|-----|
| 9 | Spannungs- und Stromquellen | 230 |
| 9.1 | Erzeugung hoher Wechselspannungen | 230 |
| 9.1.1 | Übersicht und Kenngrößen | 230 |

XII Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----|
| 9.1.2 | Prüftransformatoren | 230 |
| 9.1.2.1 | Hinweise zur Dimensionierung | 230 |
| 9.1.2.2 | Schaltungen und Bauformen | 232 |
| 9.1.2.3 | Besonderheiten im Betriebsverhalten | 238 |
| 9.1.3 | Resonanzschaltungen | 239 |
| 9.2 | Erzeugung hoher Gleichspannungen | 241 |
| 9.2.1 | Übersicht und Kenngrößen | 241 |
| 9.2.2 | Elektrostatische Generatoren | 242 |
| 9.2.2.1 | Bandgeneratoren | 242 |
| 9.2.2.2 | Trommelgeneratoren | 244 |
| 9.2.2.3 | Regelung elektrostatischer Generatoren | 245 |
| 9.2.3 | Gleichrichtung von Wechselspannungen | 246 |
| 9.2.3.1 | Einweggleichrichtung mit Spannungsglättung | 246 |
| 9.2.3.2 | Die Greinacher-Kaskadenschaltung | 248 |
| 9.2.3.3 | Sonstige Kaskadenschaltungen | 251 |
| 9.2.3.4 | Gleichrichter und Kondensatoren | 252 |
| 9.3 | Erzeugung von Stoßspannungen und Stoßströmen | 254 |
| 9.3.1 | Übersicht und Kenngrößen | 254 |
| 9.3.1.1 | Stoßspannungen | 254 |
| 9.3.1.2 | Stoßströme | 256 |
| 9.3.2 | Stoßspannungsgeneratoren | 257 |
| 9.3.2.1 | Einstufige Stoßspannungsschaltungen | 257 |
| 9.3.2.2 | Berechnung und Dimensionierung | 258 |
| 9.3.2.3 | Vervielfachungsschaltungen | 261 |
| 9.3.2.4 | Gesteuerte Auslösung und Abschneidung von Stoßspannungen | 264 |
| 9.3.2.5 | Sonstige Stoß- bzw. Impulsspannungsschaltungen | 269 |
| 9.3.3 | Stoßstromgeneratoren | 273 |
| 9.3.3.1 | Generatoren für exponentielle Stoßströme | 273 |
| 9.3.3.2 | Rechteck- oder Langzeit-Stoßstromgenerator | 276 |
| 10 | Hochspannungsmeßtechnik | 280 |
| 10.1 | Meßfunkenstrecken | 280 |
| 10.1.1 | Die Kugelfunkenstrecke (KF) | 280 |
| 10.1.2 | Sonstige Funkenstrecken mit homogenem oder quasihomogenem Feldverlauf | 287 |
| 10.1.3 | Die Stabfunkenstrecke | 288 |
| 10.2 | Spannungs- und Feldstärkemessung nach dem Influenzprinzip | 289 |
| 10.2.1 | Das Meßprinzip | 289 |
| 10.2.2 | Rotorvoltmeter, Feldmühlen | 290 |
| 10.2.3 | Schwingvoltmeter | 292 |
| 10.2.4 | Kapazitätssonde zur Feldstärke- und Spannungsmessung | 292 |
| 10.3 | Elektrostatische Voltmeter | 293 |
| 10.4 | Messung von Gleichspannungen sowie von niederfrequenten Wechselspannungen mit hochohmigen Widerständen | 295 |
| 10.5 | Messung der Scheitelwerte von Wechsel- und Stoßspannungen | 296 |
| 10.5.1 | Scheitelwertmessung von insbesondere netzfrequenten Wechselspannungen | 296 |
| 10.5.1.1 | Schaltung von Chubb und Fortescue | 297 |
| 10.5.1.2 | Spannungsteilung und Diodengleichrichtung | 298 |

| | |
|--|-----|
| 10.5.1.3 Verstärkerschaltungen | 299 |
| 10.5.2 Messung des Scheitelwertes von Stoßspannungen | 301 |
| 10.5.2.1 Stoßspannungsszillographen | 301 |
| 10.5.2.2 Analog-Digital-Converter (A/D-Wandler; ADC) | 302 |
| 10.5.2.3 Stoßspannungsvoltmeter | 303 |
| 10.6 Spannungsteiler für die Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen | 304 |
| 10.6.1 Beispiele für Hochspannungsteiler | 305 |
| 10.6.2 Die frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften | 306 |
| 10.6.3 Theorie der Spannungsteiler | 309 |
| 10.6.3.1 Ohmsche Spannungsteiler | 309 |
| 10.6.3.2 Kapazitive Spannungsteiler | 313 |
| 10.6.3.3 Der Spannungsteiler im Meßkreis | 315 |
| 10.7 Niederohmige Meßwiderstände: Impulsstrommessung | 317 |
| 10.7.1 Das Shunt-Problem | 317 |
| 10.7.2 Der koaxiale Meßwiderstand (Koaxial-Shunt; Röhren-Shunt) | 318 |
| 10.7.3 Bemerkungen zur Schirmwirkung von Koaxialkabeln | 321 |
| 10.8 Messung von Teilentladungen (TE) | 322 |
| 10.8.1 Allgemeine Problemstellung | 323 |
| 10.8.2 TE-Ströme | 323 |
| 10.8.3 Der TE-Prüfkreis | 325 |
| 10.8.4 TE-Meßverfahren | 326 |
| 10.8.4.1 Direkt integrierende Brücke | 328 |
| 10.8.4.2 Quasi-Integration der TE-Impulsströme | 329 |
| 10.8.4.3 Störspannungsmeßgeräte (RIV-Meter) | 341 |
| 10.8.5 Maßnahmen zur Störunterdrückung | 343 |
| 10.8.5.1 Brückenschaltung nach Schering | 343 |
| 10.8.5.2 Impulsdiskriminatorsystem | 345 |
| 10.8.5.3 Sonstige Schaltungsmaßnahmen | 345 |
| Literaturverzeichnis | 346 |
| Sachverzeichnis | 357 |